第39卷 第6期
2022年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

西安市热岛效应与污岛效应的相互作用研究

蒋子琪[1,2,3]， 王旭红[1,2,3]， 冯子豪[1,2,3]， 崔思颖[1,2,3]， 杨 霞[1,2,3]

（1. 西北大学城市与环境学院，陕西 西安 710127；2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室，陕西 西安 710127；3. 陕西西安城市生态系统定位观测研究站，陕西 西安 710127）

摘 要： 地表/冠层城市热岛（SUHI/CUHI）效应与大气/近地表城市污岛（AUPI/NSUPI）效应相互作用、相互影响，对城市生态环境安全造成了极大的威胁。利用地温、气温、气溶胶光学厚度、$PM_{2.5}$数据，基于空间耦合性分析和归因量化估算方法，对2003—2020年西安市辐射效应下AUPI对SUHI、湍流混合下CUHI对NSUPI的作用关系进行研究。结果表明：（1）由于冬季气溶胶辐射效应存在昼夜差异，冬季白天SUHI强度小于−0.2 K，气溶胶辐射冷却效应强导致城市地温低，城市比乡村冷；而夜晚SUHI强度大于2.2 K，气溶胶长波辐射效应增强，悬浮在城市空间的污染物颗粒成为城市的“保温层”；（2）春、夏季CUHI持续增强时，湍流混合作用加强导致近地表污染物颗粒扩散，城市$PM_{2.5}$浓度与NSUPI强度均降低；秋、冬季由于大气逆温层的影响，阻碍了由CUHI效应驱动的空气上升湍流运动，在近地表区域$PM_{2.5}$颗粒聚集、堆积，NSUPI随之增强。（3）归因分析雾霾对地表热岛的贡献值表明，夜晚气溶胶光学厚度(AOD)均与SUHI呈显著负相关，相关系数分别为−0.431、−0.386，雾霾对夜晚地表热环境主要为辐射降温效应，而对城市热岛局地气候的减弱或增强作用主要归因于城乡AOD的正负差值。城市热岛效应与污岛效应的变化密不可分，因此推进城市气候和城市污染的综合性研究对绿色城市生态环境建设具有十分重要的意义。

关键词： 西安市；地表/冠层城市热岛；大气/近地表城市污岛；空间耦合性分析；归因方法

城市热岛（Urban Heat Island, UHI）效应是一种城市地区温度高于周边乡村地区的现象，是由人类活动对地球环境的影响造成的[1]。城市与乡村的地表辐射热特性差异及地表接收太阳辐射量的差异形成了城市热岛现象[2]。全球平均日间地表热岛强度为0.85 °C，在目前全球气候变暖的背景下，白天的城市热岛强度在日益增大，大约每10 a增加0.03±0.02 ℃[3]。城市热岛强度（Urban Heat Island Intensity，UHII）的表征可以用地温和气温2种参量，因此城市热岛效应可分为地表热岛效应和大气热岛效应2种形式。其中，冠层热岛（Canopy Urban Heat Island，CUHI）效应被定义为城市区域与周围环境之间的气温差异，并通过地面气象站或移动测量进行研究。地表热岛（Surface Urban Heat Island, SUHI）效应是利用卫星遥感观测的城市或建成区和非城市地区（如水体和植被区）之间的地表温度差来表征[4]。

城市污染与乡村污染存在着城乡差异，在一般情况下，城市的污染物颗粒比农村多，称为城市污岛效应（Urban Pollution Island，UPI）[5]，以表示典型城市特征和活动的存在而导致的城乡间污染物浓度存在差异的现象。城市污岛强度（Urban Pollution Island Intensity，UPII）由城市地区和农村地区污染程度之间的差异来定义[6]。空气污染程度多采用气溶胶光学厚度（Aerosol Optical Depth，AOD）或近地表细颗粒物（Particulate Matter，PM）浓度来表征。其中，AOD是指大气中气溶胶颗粒物等介质的消光系数在垂直方向的积分，用于描述由于大气中气溶胶粒子散射和吸收而引起太阳辐射衰减的辐射效应，可作为大气柱中颗粒物浓度和空气污染程度的替代性指示标志。近地表PM主要的来源是化石燃料燃烧和人们生产生活活动中排放到城市大气的大量污染物细颗粒[7-8]。这些细颗粒物如$PM_{2.5}$被认为是影响空气质量的首要污染物，是当前大气质量监测和评价的一个重要指标[9]。基于上述2种计算指标，将UPI分为大气污岛（Atmospheric Urban Pol-

收稿日期： 2022-04-08； **修订日期：** 2022-05-11
基金项目： 国家自然科学基金（41971387）；陕西省自然科学基础研究计划（2020JM-430）
作者简介： 蒋子琪（1997-），女，硕士研究生，主要从事气溶胶与热岛效应的影响研究. E-mail: jiangziqi@stumail.nwu.edu.cn
通讯作者： 王旭红. E-mail: jqy_wxh@nwu.edu.cn

lution Island,AUPI)和近地表污岛(Near-Surface Urban Pollution Island,NSUPI)。城市污岛处于大气穹隆中,并参与城市大气穹隆中的地表空气动力、湍流运动及其他动力过程。

UHI与UPI存在一定的相互作用关系。一方面,气溶胶颗粒物通过衰减太阳辐射和增加大气下行辐射从而影响城市热岛强度的变化。气溶胶污染可以减少到达城市空间的短波太阳辐射,起到缓解城市热岛效应的作用[10-11]。同时,在特定条件下,气溶胶在吸收和散射辐射方面比长波大气窗口(波长范围8~12 μm)中的水蒸气和温室气体更有效,因此有可能增加城市地表接收的长波辐射能量[12-13]。有研究表明,气溶胶污染是夜间城市热岛UHI的主控因子之一[14-15]。另一方面,城市热岛效应能够加强湍流混合强度,增加城市边界层高度,有助于气溶胶颗粒物向高层扩散[16],而城市冷岛则降低湍流混合速率和混合层高度[17],导致近地表污染物聚集浓度升高。如Zhong等[18]发现,在西安$PM_{2.5}$严重污染的寒冷时段,恶化的天气状况与累积气溶胶污染之间存在显著的双向反馈机制。此外,UHI与UPI的相互影响也存在显著的季节效应。Ngarambe等[19]通过回归分析和方差分析发现,在韩国首尔地区,空气污染浓度与UHI之间有统计学上显著的相互作用,秋冬季污染物颗粒浓度与UHI相关性最强,春夏季较弱。He[10]也提到空气污染的季节变化是造成UHI现象季节性影响的原因。

自2000年西部大开发战略实施以来,西北地区城市人口、机动车辆、工业污染排放激增,西北部城市的热岛与空气污染之间的潜在相互作用值得进一步分析和了解。西安市位于关中盆地中部,在关中喇叭口地形的影响下,污染物易聚集[20],使西安市面临着前所未有的热污染和空气污染等的压力。同时,在目前现有研究城市热岛效应和城市污岛效应中,通常使用单一的参量表征UHI和UPI效应,很少利用多个参量分别从辐射传输效应和湍流运输2个角度下深入探讨AUPI对SUHI、CUHI对NSUPI的作用关系。此外,由于气溶胶辐射效应的不确定性,UPI与UHI的相互作用关系因城市地域和背景气候的不同而具有很大的差异性。因此,UHI效应与UPI效应两者相互作用、相互影响的关系仍需深入分析。在本研究中,以西安市为研究区,对2003—2020年间季节尺度上地表/冠层热岛效应与大气/近地表污岛效应的变化特征及相互作用关系进行了深入的剖析,并利用归因分析方法量化估算了大气污染下的城市雾霾对地表热岛强度的影响。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

选取西安市城区及其周围地区作为研究区(图1),主要包括西安市的新城区、碑林区、莲湖区、雁塔区、未央区,咸阳市的渭城区、秦都区、兴平市、泾阳县、礼泉县、泾阳县、三原县,以及西安市的鄠邑区、长安区、蓝田县、灞桥区、临潼区、高陵区、阎良区。研究区的地理位置为108°27′58″~109°19′18″E,33°55′47″~34°40′39″N之间,中部为关中平原,海拔为350~700 m,南部为秦岭山脉,北部为黄土高原,南北部海拔均在750 m以上,属暖温带半湿润大陆性季风气候,冷暖干湿四季分明。

西安市土地利用数据显示,研究区土地利用类型包括:耕地、林地、草地、水域、城镇用地、农村居民点、其他建设用地和未利用土地8类。将西安市城镇聚集区定义为城市区,在城市区外生成20~25 km的缓冲区[21],将此缓冲区内与城市区高程差在±100 m的像素、水像素、其他小城市的城镇用地聚集区、农村居民点以及其他建设用地[22]排除,剩下的区域定义为乡村区。

1.2　数据来源与处理

(1) 地表温度数据:采用MODIS的MYD11A2(C6)数据产品,空间分辨率为1 km,时间分辨率为8 d,选取“LST_Day_1 km”和“LST_Night_1 km”两项子数据集计算地表温度。这项数据由AQUA上的中分辨率成像光谱仪MODIS获取,影像获取时间为2003—2020年,轨道行列号分别为h26v05和h27v05,数据来自于美国航空航天局NASA(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/)。数据预处理过程包括:正弦投影转WGS84、拼接、裁剪、IDW插值处理等,这些过程均通过ENVI IDL和ARCPY以及NASA网站在线后处理工具进行批处理实现。

(2) AOD数据:来自MCD19A2(C6)气溶胶产品数据集,是中等分辨率成像光谱仪(MODIS)Terra和Aqua组合的多角度大气校正(MAIAC)陆地气溶胶光学厚度(AOD)网格化2级产品,空间分辨率为1

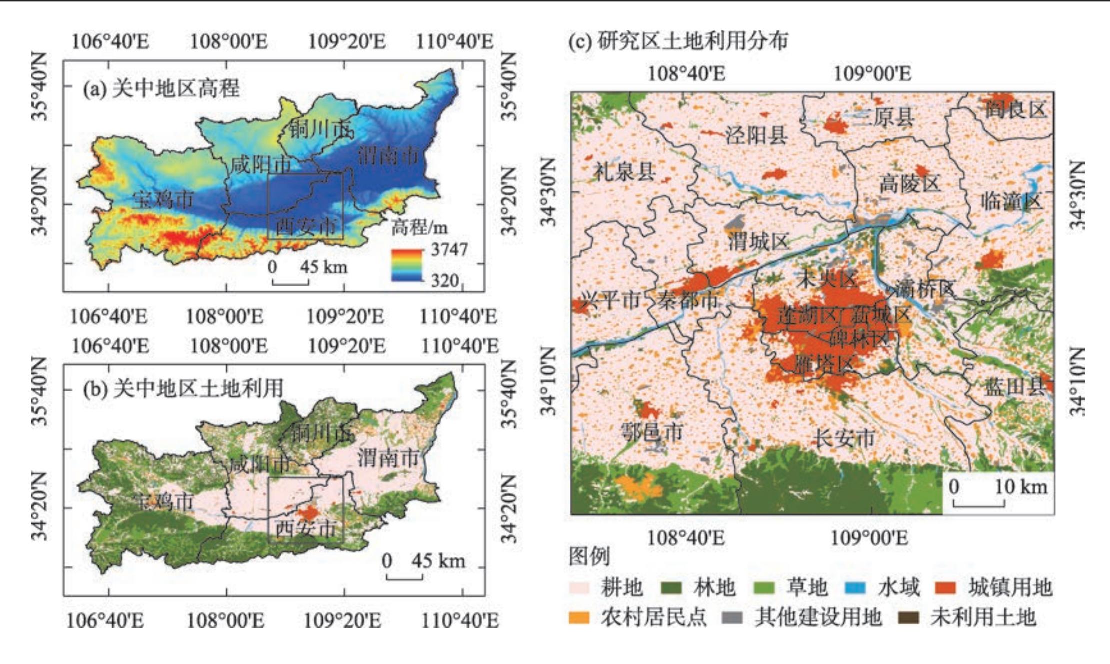


图1　研究区概况图

Fig. 1　Overview of the study area

km。AOD数据的去云、重投影、拼接、裁剪等处理借助于GEE(Google Earth Engine)云计算平台完成。

(3) 气温数据:利用国家地球系统科学数据中心发布的中国1 km分辨率逐月平均气温数据集,数据的格式为NetCDF。该数据基于中国地面824个气象站台的月值资料,采用DEM数据为协变量,利用样条法(TPS)插值生成,插值后的数据经过气象台站实测资料的阈值检验。

(4) $PM_{2.5}$浓度数据:来自美国马里兰大学大气环境遥感团队[23]制作的China High Air Pollutants (CHAP) datasets (https://weijing-rs.github.io/product.html),其空间分辨率为1 km。该数据整合了MODIS AOD数据和其他辅助数据(如地面观测站数据、卫星遥感数据、再分析和模型模拟数据),重建了中国大陆高分辨率、高质量$PM_{2.5}$数据集(即ChinaHigh$PM_{2.5}$产品)。

(5) 土地利用数据:来自地理监测云平台(http://www.dsac.cn),共有6个一级类,25个二级类及部分三级类。这项数据的耕地和城乡、工矿、居民用地平均分类精度达到85%以上,满足本研究的应用需求。

1.3　研究方法

(1) UHII、UPII的计算。UHII包括SUHII和CUHII,分别利用地温数据和气温数据计算。SUHII用MODIS MYD11A2(C6)地温数据的城乡差异值表示,SUHII可计算白天地表热岛强度($SUHII_{day}$)、夜晚地表热岛强度($SUHII_{night}$)。CUHII用国家地球系统科学数据中心的1 km逐月气温数据集的城乡差异值估算;

UPII包括AUPII和NSUPII,分别利用AOD数据和近地表污染物颗粒物$PM_{2.5}$浓度数据计算。AUPII表示为城乡间AOD的差异,NSUPII表示为城乡间$PM_{2.5}$的浓度差异。

UHII、UPII的具体计算方法如下[24]:

$$UHII_i = T_i^{city} - \bar{T}^{rural} \quad (1)$$

$$UHII = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} UHII_i \quad (2)$$

$$UPII_i = N_i^{city} - \bar{N}^{rural} \quad (3)$$

$$UPII = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} UPII_i \quad (4)$$

计算$SUHII_{day}$、$SUHII_{night}$、CUHII时,T_i^{city}分别表示城市区内每一个像素i处的白天地表温度、夜晚地表温度或气温;$\bar{T}^{rural}$分别表示乡村区的白天平均地表温度、夜晚平均地表温度、平均气温。$UHII_i$分别表示像素i处的$SUHII_{day}$、$SUHII_{night}$和CUHII;UHII分别表示整体的$SUHII_{day}$、$SUHII_{night}$和CUHII。计算AUPII和NSUPII时,N_i^{city}分别表示城市区内像素i处的AOD值或地表污染$PM_{2.5}$浓度;$\bar{N}^{rural}$分别表示乡村区的平均AOD值或平均$PM_{2.5}$浓度值。$UPII_i$分别表示像素i处的AUPII和NSUPHII。UPII分别表

示整体的AUPII和NSUPHII。

（2）空间耦合性分析。可用来分析2个要素之间的相互作用，相互影响的程度[25]。UHI与UPI的耦合协调性包括AUPI与$SUHI_{day}$、AUPI与$SUHI_{night}$、CUHI与NSUPI的耦合协调度。AUPI与$SUHI_{day}$、AUPI与$SUHI_{night}$、CUHI与NSUPI的耦合协调度分别定义为AOD与白天地表温度、AOD与夜间地表温度、气温与$PM_{2.5}$浓度在不同空间位置上相互影响和作用的程度。耦合协调度M由耦合度$M1$和综合评价值$M2$共同决定，计算公式如下：

$$M = \sqrt{M1 \times M2} \tag{5}$$

$$M1 = 2 \times \frac{\sqrt{A_1 \times A_2}}{A_1 + A_2} \tag{6}$$

$$M2 = aA_1 + bA_2 \tag{7}$$

计算AUPI与$SUHI_{day}$、AUPI与$SUHI_{night}$、CUHI与NSUPI的耦合协调度时，A_1、A_2分别表示经标准化处理后的AOD和白天地表温度、AOD和夜晚地表温度、空气温度和$PM_{2.5}$浓度；a、b为待定参数，参考前人经验，a=b=0.5，分别表明AOD和白天地表温度、AOD和夜晚地表温度、空气温度和$PM_{2.5}$浓度同等重要。

（3）量化雾霾污染对SUHI的贡献。参照Li等[26]的归因方法，Zhao等[27]及Cao等[28]利用地表能量平衡计算在南美洲和中国大陆地区各生物量（辐射、感热对流效率、蒸发、蓄热和人为放热）对地表温度城乡差异的影响。此外，Cao等[28]通过量化城市与乡村地区的长波辐射差异，利用城市气候模型以及观测减去再分析（OMR）的方法，进一步定量评估不同气候区雾霾对热岛效应的贡献。

这里用Cao等[28]的量化方法，雾霾污染通过气溶胶光学厚度AOD数据来表示，城乡长波辐射差异计算为AOD敏感度和城乡AOD差异的乘积。雾霾污染对SUHI强度变化的贡献值为ΔT_{AOD}，计算公式如下：

$$\Delta T_{AOD} = \frac{\lambda_0}{1+f} \Delta L_{\downarrow} \tag{8}$$

$$\Delta L_{\downarrow} = \mathrm{Sen} * \Delta \mathrm{AOD} \tag{9}$$

式中：λ_0表示局地气候敏感性（$\lambda_0 = 1/4\sigma T_s^3 \approx 0.2$ K·W^{-1}·m^2）；f为能量分配系数；$\Delta L_{\downarrow}$为城乡长波辐射差异；Sen为AOD敏感度；ΔAOD为城乡AOD差异。气候模型中西安市被划分为湿润区，查表可知：f=3.0±1.8、Sen=31.9±3.0。

2 结果与分析

2.1 UHI、UPI的年、季变化特征

由图2可知，$SUHII_{day}$逐年下降，年均下降率为0.038 K，$SUHII_{night}$逐年上升，年均增长率为0.061 K。西安市白天地表热岛效应从2003年至今逐步减弱，城市与乡村的地表温度逐渐接近，夜间地表热岛效应则逐年增强，城市比乡村越来越暖热，这与梁秀娟等[14]、Lu等[29]关于西安市地表热岛的变化研究结果相同。CUHII年际间保持稳定，年均增长率仅为0.007 K。AUPII在2003—2020年逐年下降且降幅较小，年均下降率为0.003。NSUPII在2003—2020年也逐年下降，年均下降率为0.223 μg·m^{-3}。西安市AOD、细颗粒物$PM_{2.5}$浓度的城乡差距在逐年减小，表明西安市大气污岛、近地表污岛效应均减弱。

由表1可知，$SUHII_{night}$的年均值（3.078 K）高于$SUHII_{day}$（1.66 K），夜间的地表热岛效应更强烈。夜间UHI的驱动因素主要是城市地表白天获取的太阳辐射能的释放和人为热排放[30]，城市中心区比郊区储热量大、热源多，导致了夜晚热岛效应明显。此外，同一季节地表热岛效应存在昼夜差异，尤其在冬季。冬季白天、夜晚的SUHI强度分别为−0.767 K、3.38 K，这种白天呈现冷岛效应，夜晚显示为强热岛效应的现象可能是由空气污染作用下的地表热辐射、人为热和大气热辐射等不同源的辐射作用共同导致的。同时，CUHII的年均值（0.723 K）明显小于$SUHII_{day}$和$SUHII_{night}$，城乡地表蒸散发冷却效果的差异导致了城乡区的气温差异低于地表温度差异[31]。

AUPII的年均值为0.017，季节均值分别为：春季（−0.02）、夏季（0.043）、秋季（0.047）、冬季（−0.004），夏秋季的AUPII强于春冬季。结合西安市的气象，分析其自然因素为：夏秋季西安市大气湿度较高，温暖潮湿的环境使得吸湿性气溶胶颗粒的平均粒径增大，大气消光系数增加，增强了形成气溶胶的能力；此外，夏季太阳辐射增强，大气垂直运动剧烈，形成较强的气溶胶垂直运输，使大气的气溶胶含量增强[32]。而春冬季为干冷天气、风速较大且存在逆温层，高空污染物不易堆积[33]，因此AUPI较小。

NSUPI强度存在季节差异，其在冬季最强

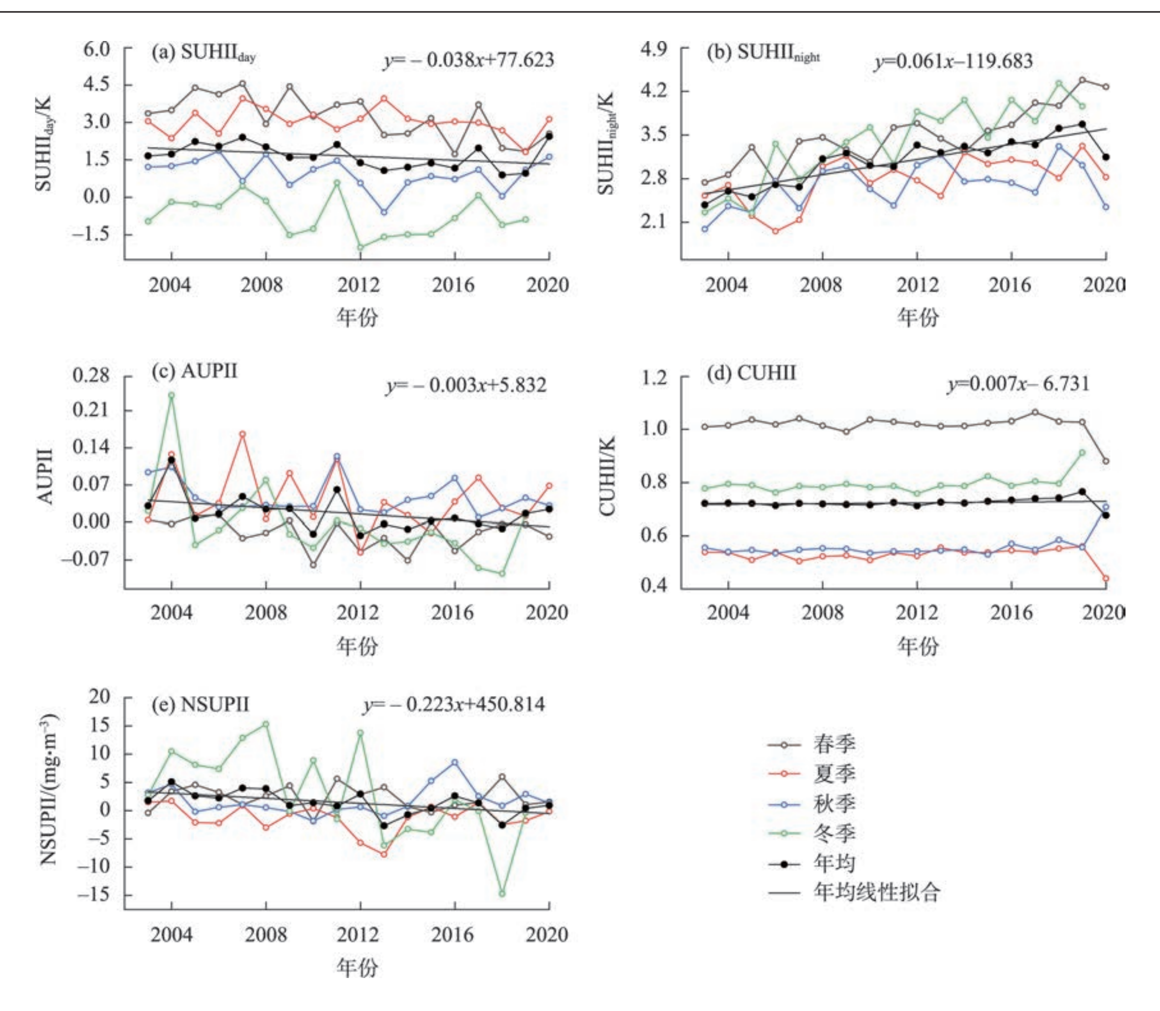


图2 热岛强度与污岛强度的年、季变化

Fig. 2 Annual and seasonal variation of UHII and UPII

(3.015 μg·m^{-3}),春秋季的NSUPI强度次之(分别为2.274 μg·m^{-3}、1.666 μg·m^{-3}),夏季最弱(−1.260 μg·m^{-3})。NSUPI效应的季节差异由细颗粒物的城乡差异决定,机动车尾气排放是一年中细颗粒物的持续性来源,燃煤等其他因素导致的细颗粒物季节性排放是形成NSUPI的季节差异的主要原因。因此,冬季供暖季节,城市区燃煤、燃薪等增加了空气中的污染颗粒物浓度,最终导致冬季的城乡间细颗粒物浓度差距大于其他季节;春季西安市多扬尘天气,秋季为农忙季,多秸秆燃烧[34],造成了春秋季的NSUPI强度仅次于冬季;夏季乡村区$PM_{2.5}$浓度高于城市区,NSUPI强度为负值,考虑为城市热作用下的空气湍流、扩散导致的。

2.2 UHI与UPI的空间耦合性分析

利用空间耦合性模型对UHI与UPI进行分析。耦合协调度数值越大的地方,表明变量间相互作用

表1 UHII与UPII的年、季均值

Tab. 1 Annual and quarterly mean values of UHII and UPII

UHII & UPII	春季	夏季	秋季	冬季	年平均
SUHII$_{day}$/K	3.232	3.041	0.957	−0.767	1.66
SUHII$_{night}$/K	3.482	2.779	2.685	3.380	3.078
CUHII/K	1.016	0.529	0.558	0.794	0.723
AUPII	−0.020	0.043	0.047	−0.004	0.017
NSUPII/(μg·m^{-3})	2.274	−1.260	1.666	3.015	1.394

的能力越强。图3、图4和图5分别显示了2003—2020年不同季节下 $SUHI_{day}$ 与AUPI、$SUHI_{night}$ 与AUPI、CUHI与NSUPI的空间耦合性分布。表2统计了城市区和乡村区的耦合性均值，并计算了城乡间的耦合性差异值。整体来看，除了鄠邑区、长安区、蓝田县南部秦岭山地高海拔地区的UHI与UPI的耦合协调度小于0.6外，西安市及其周边区、县域的UHI与UPI空间耦合协调度基本大于0.8，UHI与UPI在空间上相互作用显著。

2.2.1　SUHI与AUPI的空间耦合效应　由图3可知，季节上秋、冬季的整体耦合性高于春、夏季，表明地表温度与雾霾相互作用强度在秋冬季较强。空间分布上，春、夏及秋季高耦合协调度区呈东北至西南的趋势分布，而冬季东部的临潼区、高陵区、灞桥区和北部未央区及南部长安区的北部等区域的耦合协调度高于处于西安市中心的莲湖区、碑林区、雁塔区。城乡间耦合性差异值在春、夏和秋季为正值且夏季最高(0.0525)，而在冬季为负值(−0.0124)(表2)，表明春、夏和秋季白天SUHI与AUPI可能呈正向作用，而冬季白天SUHI随AUPI呈反向作用。

由图4可知，季节上除了春季耦合性稍弱外，夏、秋、冬季的整体耦合性分布相似且协调度高于春季。空间上来看，夜间耦合性分布与白天相反，表现为耦合协调度高值区集中在城市中心的莲湖区、新城区、碑林区、雁塔区，当其他区县距离城市中心越远时，耦合协调度下降。此外，夜间的城乡耦合性差异明显高于白天，尤其是秋季夜晚的耦合性差异值达到了0.0689(表2)。这表明在气象状况稳定的情况下，夜间各季节城市区气溶胶辐射作用的能力高于乡村区，可能会导致AUPI与SUHI的相互促进、共同增强。值得注意的是，一场强风或暴雨也可能会减弱或中断这种相互作用。

2.2.2　CUHI与NSUPI的空间耦合效应　由图5可以看出，近地表区域CUHI与NSUPI联系紧密，耦合协调度在各个季节均高于SUHI与AUPI的空间耦合度。在季节变化上，夏、秋季的空间耦合度高于春、冬季。夏、秋季所有区、县的低海拔地区的耦合性基本大于0.925，CUHI与NSUPI相互影响的能力强

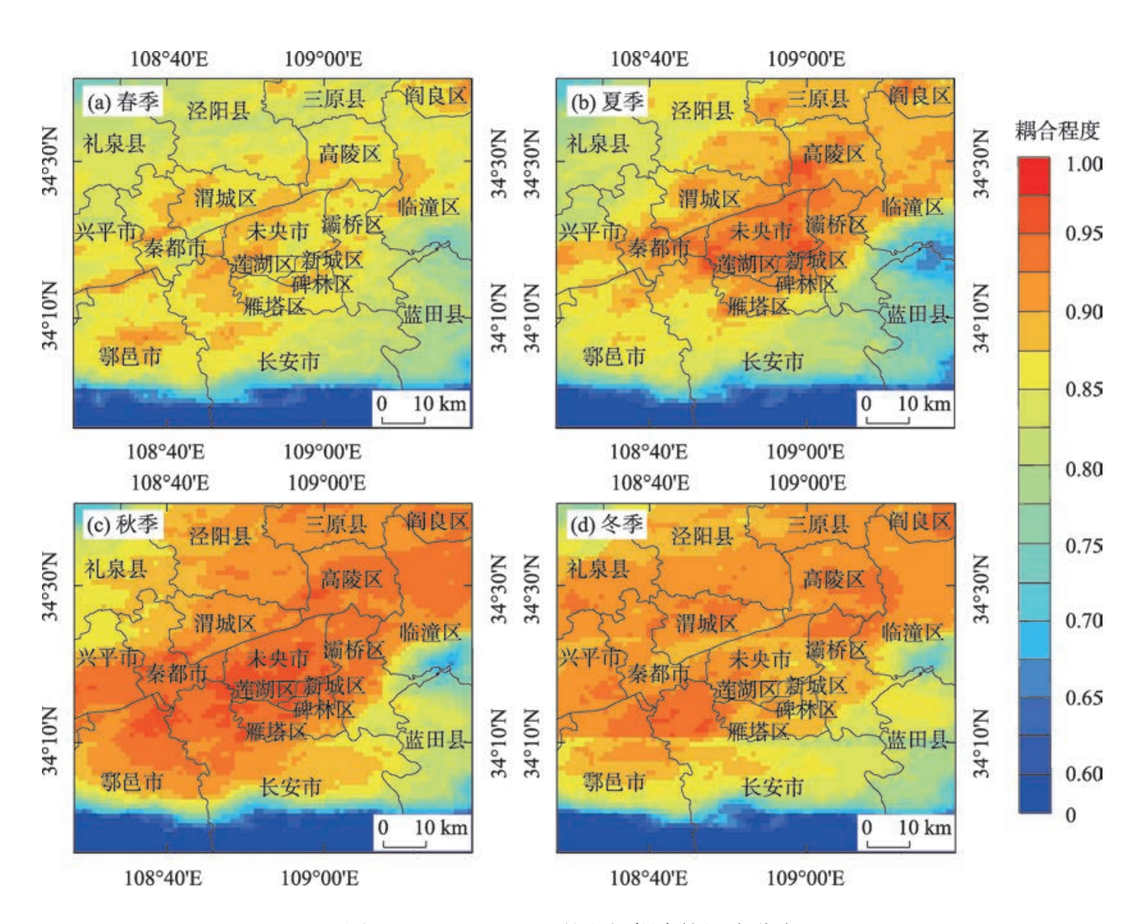


图3　$SUHI_{day}$ & AUPI的空间耦合协调度分布

Fig. 3　Spatial coupling coordination degree distribution of $SUHI_{day}$ & AUPI

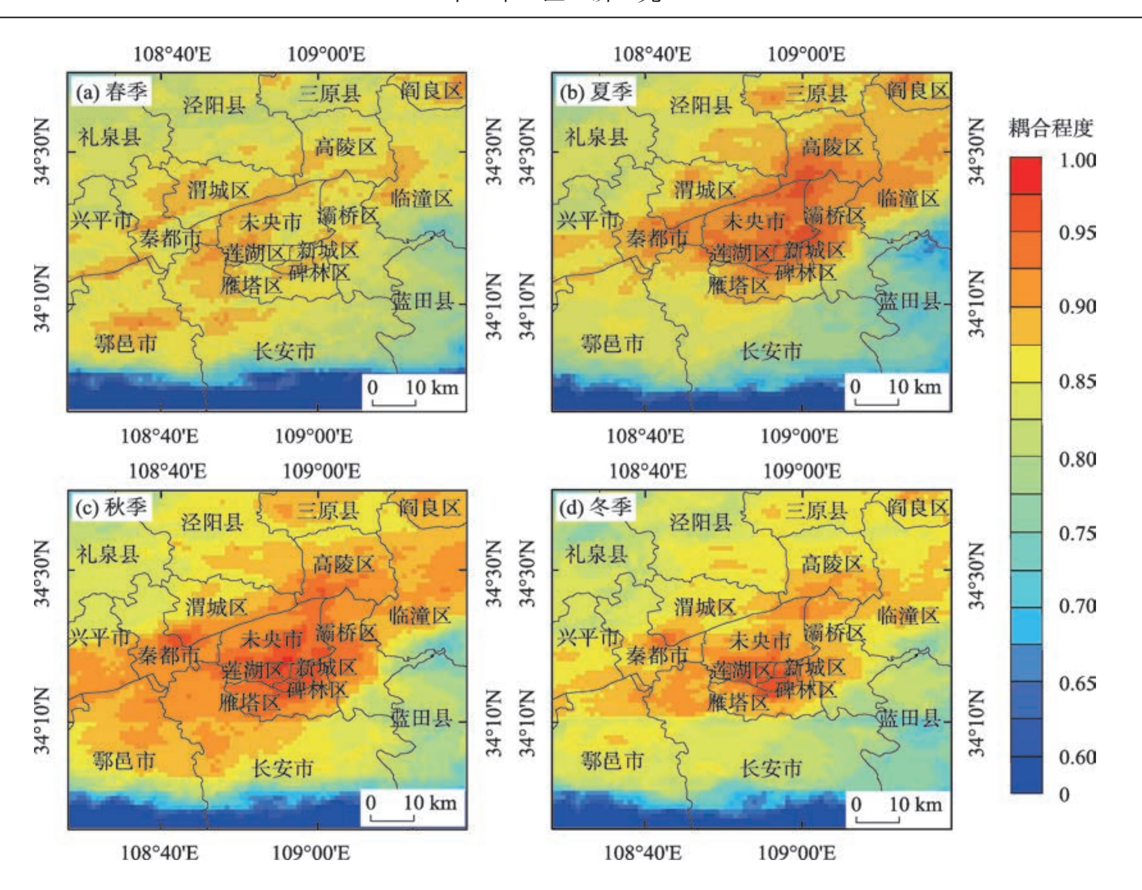


图4 $SUHI_{night}$ & AUPI的空间耦合协调度分布

Fig. 4 Spatial coupling coordination degree distribution of $SUHI_{night}$ & AUPI

于其他季节。从空间上来看,由于夏季高耦合性区域分布广泛,使得城乡间的耦合性差异(0.0036)并不明显(表2),导致夏季CUHI与NSUPI相互作用、相互反馈的程度弱于其他季节。

2.3 UHI与UPI相互作用分析

2.3.1 辐射效应下AUPI对SUHI的影响 由图6可知,春、秋季的地表热岛SUHI效应与AUPI的变化存在相同趋势,但由于受春、秋季气象因素等的干扰影响,气溶胶的辐射效应特征呈复杂性。夏季的白天和夜间,SUHII与AUPII的增长趋势相同,这是季节效应因素影响的结果。夏季炎热,地表热岛效应强烈且仅次于春季(表1),加之夏季大气上行运动强烈,气溶胶垂直输送至上空,导致AUPI效应强于其他季节,且夏季AUPII>0.5时所占频率高于其他季节。

冬季,SUHII的变化态势主要由气溶胶辐射效应驱动形成。从图6可看出,$SUHII_{day}$小于−0.2 K,城市地温低,城市比乡村冷;而夜间地表热岛效应强烈,$SUHII_{night}$大于2.2 K,最高值能达3.642 K,城市地温远远高于周围乡村。分析其原因是西安市在冬季重污染情况下[35],白天由于气溶胶的辐射冷却作用强,地表接收的太阳辐射减少,从而导致城市地表异常降温[36]。因此,冬季白天城市地表温度低于乡村,表现为冷岛效应。而在夜晚,气溶胶的长波辐射效应明显,成为城市区地温的“保温层”。Wu等[37]的研究也表明,气溶胶污染在白天减少城市变暖,但在污染水平较高的夜间会加剧城市变暖。

2.3.2 湍流作用下CUHI对NSUPI的影响 由图7可知,当春季CUHII为0.7~1.3 K、夏季CUHII在0.1~0.8 K时,冠层热岛CUHI效应与近地表污岛NSUPI效应同时增强,增幅分别为0.6 K、3.655 μg·m^{-3}(春季),0.7 K、4.344 μg·m^{-3}(夏季)。这是因为由机动车引起的交通“污排放”(汽车尾气、扬尘等)与道路交通“热排放”同时升高了城市区的$PM_{2.5}$浓度和气温[38],CUHI与NSUPI效应因此增强,且夏季强于春季。然而,当春季CUHII>1.3 K、夏季CUHII>0.8 K时,城市区$PM_{2.5}$浓度、NSUPI强度均降低。究其原因为:CUHI持续增强时,冠层热岛效应导致的高温可以通过加强湍流从而降低城市地区的近地表颗粒物浓度和NSUPI[13]。值得注意的是,当春季

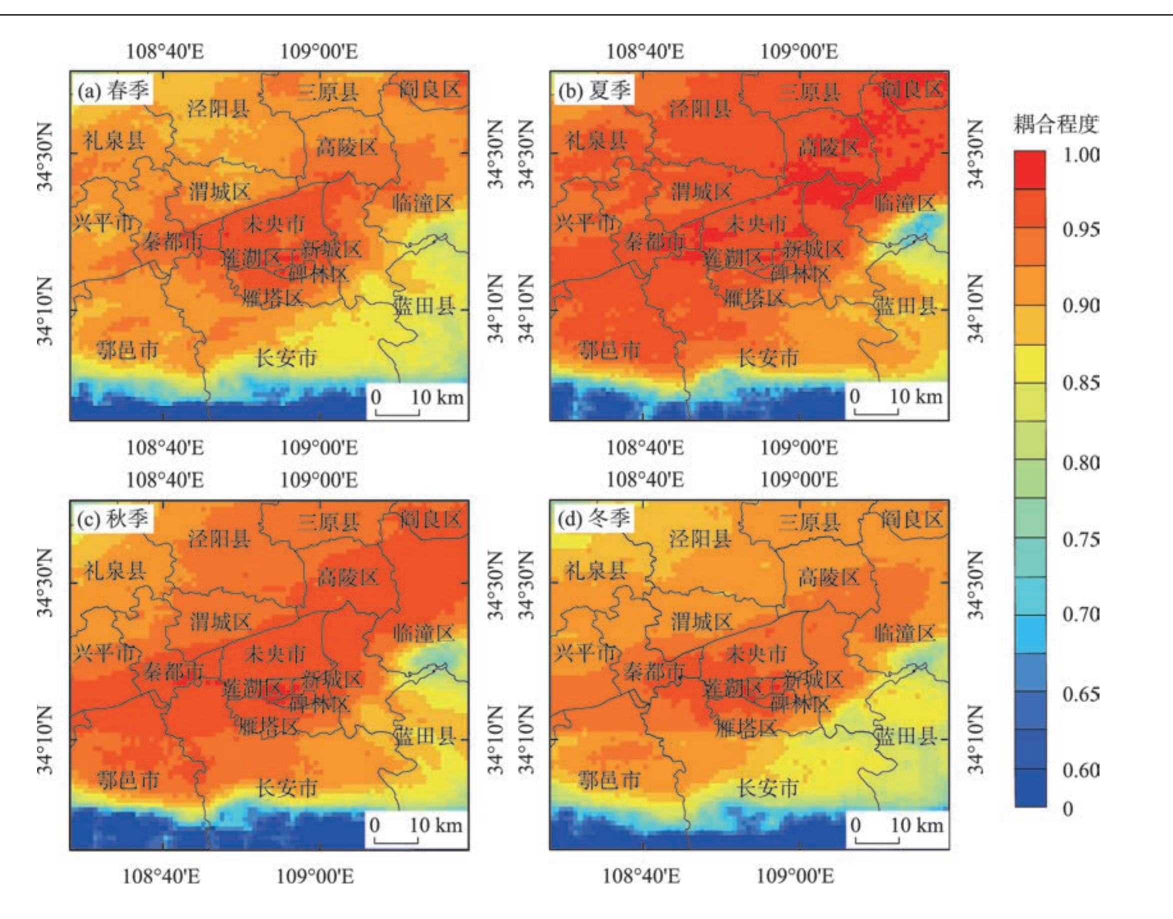


图5　CUHI & NSUPI的空间耦合协调度分布

Fig. 5　Spatial coupling coordination degree distribution of CUHI & NSUPI

表2　城市与乡村区耦合协调度均值及城乡耦合协调度差值

Tab. 2　The mean value of coupling coordination degree in urban and rural areas and the difference value of coupling coordination degree between urban and rural areas

UHI/UPI耦合对	季节	城市区	乡村区	城乡耦合性差异
$SUHI_{day}$ & AUPI	春季	0.8669	0.851	0.0159
	夏季	0.9149	0.8624	0.0525
	秋季	0.9431	0.9052	0.0379
	冬季	0.8919	0.9043	−0.0124
$SUHI_{night}$ & AUPI	春季	0.8842	0.8525	0.0317
	夏季	0.9168	0.8578	0.059
	秋季	0.9423	0.8734	0.0689
	冬季	0.9135	0.854	0.0595
CUHI & NSUPI	春季	0.9524	0.9107	0.0417
	夏季	0.9587	0.9551	0.0036
	秋季	0.9606	0.9382	0.0224
	冬季	0.9462	0.9126	0.0336

CUHII<0.8 K时,NSUPI、城市区$PM_{2.5}$浓度均呈由高初值后下降的趋势。这可能是由于气温和污染物浓度的变化不同步造成的[10],后者的形成需要更多的时间,存在着滞后性。在CUHI较低的早春时期,高NSUPI与高$PM_{2.5}$浓度可能是冬季的后续效应。

由图7秋冬季变化状况可知,秋季城市区的$PM_{2.5}$浓度相对稳定,浓度变化范围波动在69~80 $\mu g \cdot m^{-3}$之间;而冬季城市区$PM_{2.5}$浓度随CUHI增大

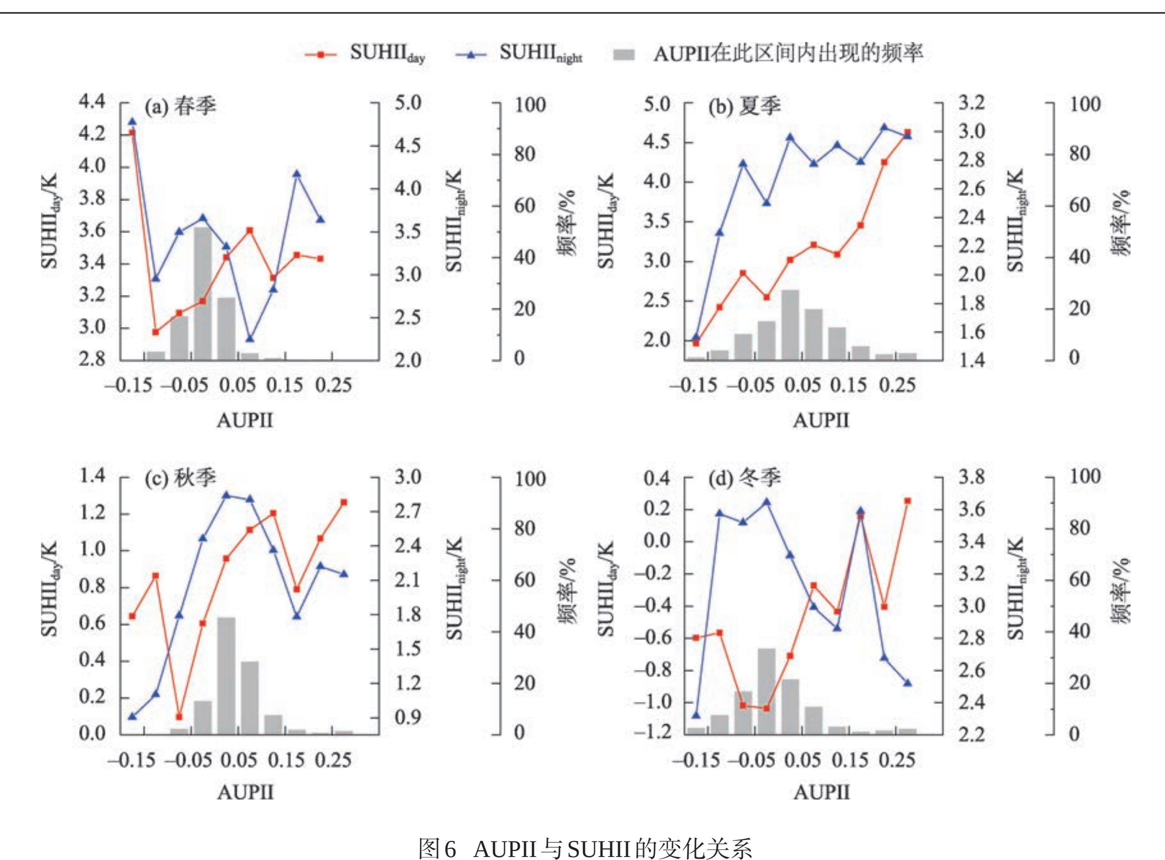


图6 AUPII与SUHII的变化关系

Fig. 6 Variation relationship between AUPII and SUHII

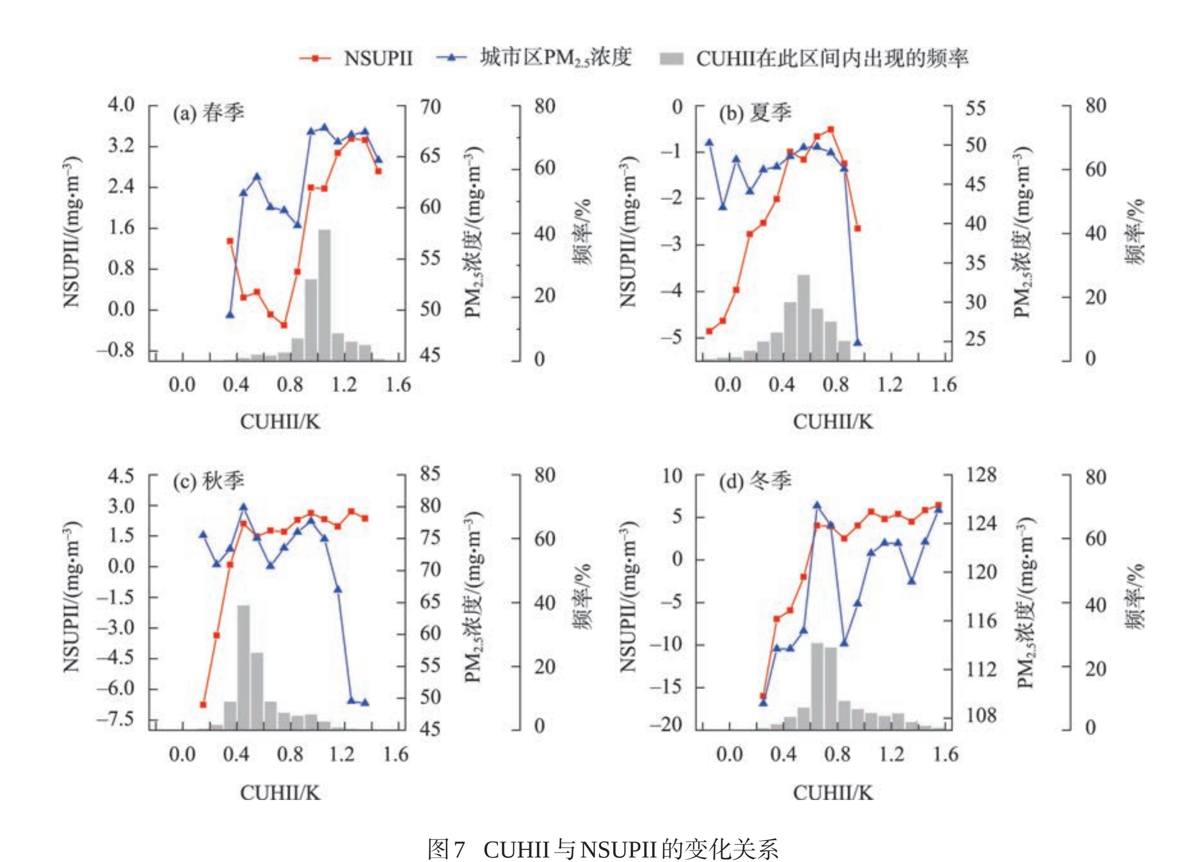


图7 CUHII与NSUPII的变化关系

Fig. 7 Variation relationship between CUHII and NSUPII

呈波动上升状态,从109.187 μg·m^{-3}提高到122.463 μg·m^{-3}。说明秋冬时期城市区细颗粒物浓度始终处于高水平,且冬季有增加态势。秋、冬季的NSUPI效应持续增强,其变化趋势与CUHII强度有关。秋季CUHII<0.5 K、冬季CUHII<0.7 K时,秋、冬季NSUPI增强迅速,增长幅度分别为5.473 μg·m^{-3}、10.984 μg·m^{-3};随着CUHII持续增长,NSUPI的增长速率缓慢,增长幅度分别为0.248 μg·m^{-3}、1.806 μg·m^{-3}。表明在城市冠层热岛的高温影响下,秋冬季CUHII的持续增强,加强了NSUPI效应,这与春夏的CUHII对NSUPI影响作用趋势相反。高CUHI效应导致的湍流混合并未使城市区$PM_{2.5}$浓度降低。这是因为在逆温层的存在下,大气对流层中气温随高度增加,CUHI效应导致的空气上升运动被阻碍,$PM_{2.5}$等污染物颗粒被困在近地表区域[39],并逐渐聚集、堆积。因此,城市区$PM_{2.5}$颗粒物浓度增大,城乡间的$PM_{2.5}$浓度差异增大,NSUPI增强。此外,对流层的逆温现象使高空大气污染物扩散至周围乡村区,大气污染物在风的作用下在乡村区逆流循环。

2.4 雾霾污染对SUHI的量化估算

表3显示了AOD与城市地表热岛强度SUHI的相关性。白天城市AOD均值、乡村AOD均值与地表热岛SUHI相关性并不显著,相关系数小于0.1。这种不显著关系是由于白天气溶胶颗粒既散射太阳辐射又截留长波辐射,气溶胶对地表热岛的影响较为复杂造成的。夜晚城市AOD、乡村AOD均与SUHI呈显著负相关,相关系数分别为−0.431、−0.386,且$P<0.01$。AOD对夜晚热岛效应的明显的负相关趋势表明雾霾减弱了热环境,产生降温效果。由于白天AOD与地表热岛效应的相关系数小于夜晚,且相关性不显著,故这里只考虑夜间AOD对地表热岛的影响。

表3 AOD与SUHI的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient between AOD and SUHI

AOD	白天SUHI	夜晚SUHI
城市AOD	0.002	−0.431**
乡村AOD	−0.001	−0.386**

注:**表示显著性水平$P<0.01$。

从图8中可以看出,雾霾对热岛效应的贡献值在−0.25~0.1 K之间。多数年份表现为城市AOD大于农村,城市降温效果更显著、ΔT_{AOD}为负值。尤其是2004年、2011年城乡AOD差距明显、雾霾减弱热岛的作用效果强,ΔT_{AOD}分别为−0.235 K、−0.179 K。而2010年、2012年乡村AOD大于城市,乡村降温程度强于城市,因此加强了城市热岛效应,ΔT_{AOD}分别为0.034 K、0.039 K。此外,2005年以及2013—2018年间AOD差距不明显且城市、乡村AOD均较小,ΔT_{AOD}在−0.05~0.05 K之间,雾霾对热岛的影响并不明显。

3 讨论

通过MYD11A2地温数据、MYD04气溶胶数据、气温数据集以及$PM_{2.5}$数据集计算地表热岛、大气污岛、冠层热岛和近地表污岛,从季节尺度上分析了AUPI对SUHI的作用、CUHI对NSUPI的作用。

AUPI与SUHI的分析表明,春、夏和秋季气溶胶对地表热岛的作用机理复杂;而冬季西安市气溶胶辐射效应对地表热岛的作用明显,表现为气溶胶白天冷却地表温度、夜晚增温,导致西安市白天的热

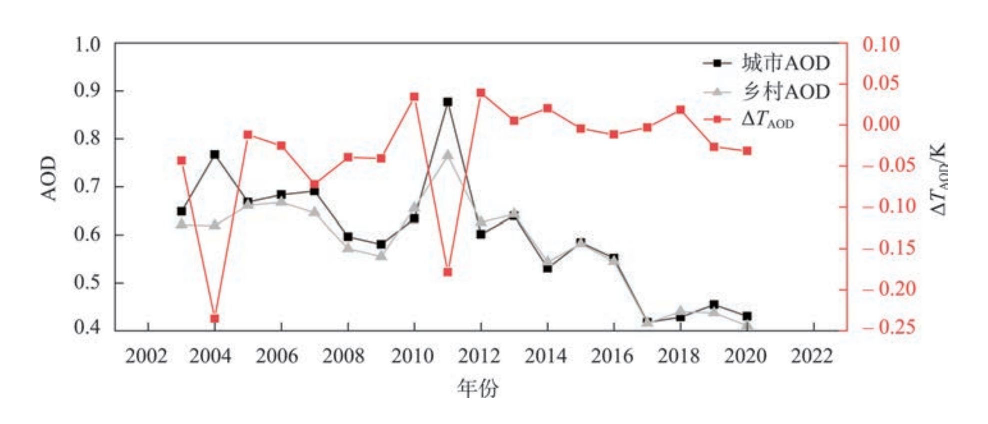


图8 城市AOD、乡村AOD及ΔT_{AOD}的年变化

Fig. 8 Annual variation of AOD in city, AOD in rural and ΔT_{AOD}

岛效应减弱，夜晚的热岛效应增强。这是因为当存在降雨、风等时，局地环流会通过运输污染物、改变大气相对湿度，使得气溶胶辐射效应相对复杂，其对地表热岛的作用机制难以分析，这主要发生在气象因素不稳定的季节。冬季大气相对稳定时，气溶胶颗粒白天削弱入射太阳辐射，发生辐射冷却效应；夜晚增强大气长波辐射，增加到达地表的辐射。CUHI与NSUPI的分析表明，春夏季冠层热岛效应持续增强时，城市内$PM_{2.5}$浓度下降、近地表污岛强度降低；秋冬季CUHI导致的湍流作用增强时，近地表城乡细颗粒物差异反而增大，NSUPI增强。这是因为春夏季热岛效应导致的湍流作用将城市污染物颗粒扩散至农村，降低了NSUPI。而干冷的秋冬季由于逆温层的存在，"上暖下凉"的逆温层结构将压抑和阻碍地面空气层的对流运动，热岛效应导致的近地表湍流作用无法向上运输颗粒物，城市内污染物堆积，工业废气等也在近地面的空气层中逐渐积累。因此，西安市秋冬季多为严重雾霾天，近地表污岛效应进一步增强。

除本研究区外，北京、天津、廊坊、保定[40]、南京[41]等城市均存在这样的气溶胶辐射作用机制。然而在风等气象条件作用下，由风输送的污染物会改变其浓度[42]，输送的水汽增强了气溶胶的吸湿增长和多相反应[18]等。既改变了气溶胶辐射效应，又改变了局地环流。对于冠层热岛的湍流作用，西北部山谷城市兰州，由于污染物不易扩散，冬季强逆温使污染物进一步聚集[43-46]，湍流作用也被抑制[47]，其反应机理与西安市相同。但是由于城市地区边界层结构和局地环流的复杂性，热岛效应与气溶胶污染之间存在复杂的关系。在降水更充沛的南方地区以及沿海城市，存在湿度高、强海风的影响。沿海城市的局地环流还受到城市风、海风和陆风的共同影响，需结合具体状况分析。因此，城市污染的热岛环流、水平传输和垂直混合受主导风向和地形的影响，并参与影响城市热岛效应与城市污岛的相互作用。

由于影响空气质量的原因和条件的复杂性，解释污染物浓度和热岛强度之间的精确关系还需要考虑研究区的地形、气象条件、人为排放等因素。此次分析的角度是长时间序列下的UHI与UPI相互作用的季节变化，忽略了更具体的本地气候、局地环流带来的影响，还存在着不足。考虑到污染物浓度、边界层高度、水汽、长波辐射之间存在复杂的关系、过程和反馈，未来将选取冬季典型重雾霾日，结合具体气象条件及辐射数据，以详尽探究UHI与UPI的相互作用关系。

4 结 论

（1）2003—2020年$SUHII_{day}$逐年下降，$SUHII_{night}$逐年上升；$SUHII_{day}$的年均下降率为0.038 K，$SUHII_{night}$的年均增长率为0.061 K；且年均夜间的地表热岛效应（3.078 K）强于白天（1.66 K）；CUHII年际间保持稳定，年均值（0.723 K）低于SUHII。AUPII逐年下降且降幅较小，年均下降率为0.003，AUPII的年均值为0.017；NSUPII年均下降率为0.223 μg·m^{-3}，年均值为1.394 μg·m^{-3}。

（2）AUPI与$SUHI_{day}$的城乡间耦合性差异值在春、夏及秋季为正值，在冬季为负值，冬季AUPI与$SUHI_{day}$的作用效力与其他季节相反，而夜间各季节城乡耦合性差异值均为正值。CUHI与NSUPI整体耦合协调度高于SUHI与AUPI的空间耦合度。

（3）AUPI对SUHI的影响：春、秋季的地表热岛SUHI效应与AUPI的变化趋势相同，气溶胶的辐射效应特征呈复杂性。夏季的白天和夜间，SUHII与AUPII的增长趋势相同，这是季节效应因素影响的结果。冬季，SUHII的变化态势主要由气溶胶辐射效应驱动形成，其白天存在气溶胶的辐射冷却作用，SUHI强度低于-0.2 K，夜晚气溶胶增强长波辐射强度，SUHI强度高于2.2 K。

CUHI对NSUPI的影响：春、夏季CUHI持续增强时，湍流混合加强导致近地表污染物颗粒扩散，城市区$PM_{2.5}$浓度、NSUPI强度均降低；秋冬季CUHI效应导致的空气上升运动被逆温层阻碍，城市区$PM_{2.5}$颗粒在近地表区域聚集、堆积，NSUPI增强。

（4）AOD与SUHI的相关性在白天不明显而在夜晚显著，由于夜晚城市AOD、乡村AOD与SUHI呈负相关性，相关系数分别为-0.431、-0.386。因此雾霾对热环境主要是降温作用，尤以2004年、2011年最为显著，由雾霾减弱的西安市热岛强度分别为-0.235 K、-0.179 K。而在2010年、2012年，由于城乡雾霾分布的负差异，乡村AOD大于城市，乡村降温程度大于城市，因此相对地加强了城市热岛效应，ΔT_{AOD}分别为0.034 K、0.039 K。

致谢:ChinaHighPM$_{2.5}$数据集由美国马里兰大学大气环境遥感团队提供,在此表示衷心感谢!

参考文献(References):

[1] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982, 108(455): 1–24.

[2] Zhao S Q, Zhou D C, Liu S G. Data concurrency is required for estimating urban heat island intensity[J]. Environmental Pollution, 2016, 208(Pt A): 118–124.

[3] Chakraborty T, Lee X. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 74: 269–280.

[4] Deilami K, Kamruzzaman M, Liu Y. Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 67: 30–42.

[5] Crutzen P J. New Directions: The growing urban heat and pollution "island" effect-impact on chemistry and climate[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(21): 3539–3540.

[6] Ulpiani G. On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework[J]. Science of the Total Environment, 2020, 751 (38): 141727, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141727.

[7] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J-I, et al. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980–2020[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007, 7(16): 4419–4444.

[8] Bonn B, Von Schneidemesser E, Andrich D, et al. BAERLIN2014–the influence of land surface types on and the horizontal heterogeneity of air pollutant levels in Berlin[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(12): 7785–7811.

[9] Pongpiachan S, Ho K F, Cao J J. Estimation of gas-particle partitioning coefficients (Kp) of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in carbonaceous aerosols collected at Chiang-Mai, Bangkok and Hat-Yai, Thailand[J]. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention, 2013, 14(4): 2461–2476.

[10] He B-J. Potentials of meteorological characteristics and synoptic conditions to mitigate urban heat island effects[J]. Urban Climate, 2018, 24: 26–33.

[11] Jin M S, Kessomkiat W, Pereira G. Satellite-observed urbanization characters in Shanghai, China: aerosols, urban heat island effect, and land-atmosphere interactions[J]. Remote Sensing, 2011, 3(1): 83–99.

[12] Jacobson M Z. Studying the effects of aerosols on vertical photolysis rate coefficient and temperature profiles over an urban airshed [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(D9): 10593–10604.

[13] Li H D, Meier F, Lee X H, et al. Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin[J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 818–828.

[14] 梁秀娟, 王旭红, 牛林芝, 等. 大西安都市圈城市热岛效应时空分布特征及AOD对热岛强度的影响研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(8): 1566–1580. [Liang Xiujuan, Wang Xuhong, Niu Lingzhi, et al. Research on the temporal and spatial distribution characteristics of urban heat island effect and the influence of AOD on urban heat island intensity in the greater Xi'an metropolitan area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(8): 1566–1580.]

[15] 曹畅, 李旭辉, 张弥, 等. 中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 3987–3997. [Cao Chang, Li Xuhui, Zhang Mi, et al. Correlation analysis of the urban heat island effect and its impact factors in China[J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 3987–3997.]

[16] Sarrat C, Lemonsu A, Masson V, et al. Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(10): 1743–1758.

[17] Fallmann J, Forkel R, Emeis S. Secondary effects of urban heat island mitigation measures on air quality[J]. Atmospheric Environment, 2016, 125(Pt A): 199–211.

[18] Zhong J T, Zhang X Y, Wang Y Q, et al. The two-way feedback mechanism between unfavorable meteorological conditions and cumulative aerosol pollution in various haze regions of China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(5): 3287–3306.

[19] Ngarambe J, Joen S J, Han C-H, et al. Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO_2, NO_2, O_3 and urban heat island in Seoul, Korea[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123615, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123615.

[20] 胡琳, 程路, 林扬, 等. 关中区域大气重污染年份气象条件分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1496–1503. [Hu Lin, Cheng Lu, Lin Yang, et al. A conceptual model of regional pollution and meteorological conditions in Guanzhong region[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1496–1503.]

[21] Yao R, Wang L C, Huang X, et al. Temporal trends of surface urban heat islands and associated determinants in major Chinese cities[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 742–754.

[22] Han G F, Xu J H. Land surface phenology and land surface temperature changes along an urban-rural gradient in Yangtze River Delta, China[J]. Environmental Management, 2013, 52(1): 234–249.

[23] Wei J, Li Z Q, Lyapustin A, et al. Reconstructing 1 km-resolution high-quality $PM_{2.5}$ data records from 2000 to 2018 in China: spatiotemporal variations and policy implications[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 252: 112136, doi: 10.1016/j.rse.2020.112136.

[24] Zhong C, Chen C, Liu Y, et al. A specific study on the impacts of $PM_{2.5}$ on urban heat islands with detailed in situ data and satellite images[J]. Sustainability, 2019, 11(24): 7075, doi: 10.3390/su11247075.

[25] 刘巧婧, 王莉红. 城市化与生态环境耦合协调关系研究——以杭州市为例[J]. 环境科学学报, 2018, 38(10): 4214−4222. [Liu Qiaojing, Wang Lihong. Examination of a coupling coordination relationship between urbanization and the eco-environment: Case study of Hangzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(10): 4214−4222.]

[26] Li X, Goulden M L, Hollinger D Y, et al. Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes[J]. Nature, 2011, 479(7373): 384−387.

[27] Zhao L, Li X H, Smith R B, et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands[J]. Nature, 2014, 511(7508): 216−219.

[28] Cao C, Li X H, Liu S D, et al. Urban heat islands in China enhanced by haze pollution[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 12509, doi: 10.1038/ncomms12509.

[29] Lu L L, Weng Q H, Xiao D, et al. Spatiotemporal variation of surface urban heat islands in relation to land cover composition and configuration: A multi-scale case study of Xi'an, China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2713, doi: 10.3390/rs12172713.

[30] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 370−384.

[31] Sun H, Chen Y H, Zhan W F. Comparing surface-and canopy-layer urban heat islands over Beijing using MODIS data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(21): 5448−5465.

[32] 王钊, 彭艳, 车慧正, 等. 近10年关中盆地MODIS气溶胶的时空变化特征[J]. 高原气象, 2013, 32(1): 234−242. [Wang Zhao, Peng Yan, Cheng Huizheng, et al. Analyses on spatial and temporal characteristics of AOD in Guanzhong region of Shaanxi Province using long term MODIS data[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(1): 234−242.]

[33] 郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 等. 基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系[J]. 环境科学, 2022, 43(7): 3494−3507. [Zheng Yurong, Wang Xuhong, Cui Siying, et al. Aerosol optical characteristics with ground-based measurements by sun photometer and its relationship with PM particle concentration in Chang'an[J]. Environmental Science, 2022, 43(7): 3494−3507.]

[34] 刘随心, 曹军骥, 安芷生. 西安大气细粒子($PM_{2.5}$)质量浓度变化特征及其影响因素[J]. 过程工程学报, 2009, 9(S2): 231−236. [Liu Suixin, Cao Junji, An Zhisheng. Characterization of ambient fine particles ($PM_{2.5}$) concentration and its influential factors in Xi'an[J].The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(S2): 231−236.]

[35] Wei N, Wang N L, Huang X, et al. The effects of terrain and atmospheric dynamics on cold season heavy haze in the Guanzhong Basin of China[J]. Atmospheric Pollution Research, 2020, 11(10): 1805−1819.

[36] Wang L L, Gao Z Q, Miao S G, et al. Contrasting characteristics of the surface energy balance between the urban and rural areas of Beijing[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(4): 505−514.

[37] Wu H, Wang T J, Riemer N, et al. Urban heat island impacted by fine particles in Nanjing, China[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 11422, doi: 10.1038/s41598-017-11705-z.

[38] 王琮淙, 邱国玉, 黄晓峰. 城市热岛效应与$PM_{2.5}$的关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(5): 191−195. [Wang Congcong, Qiu Guoyu, Huang Xiaofeng. Relationship between urban heat island and $PM_{2.5}$[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(5): 191−195.]

[39] 刘子龙, 代斌, 崔卓彦, 等. 大气污染物浓度变化特征及潜在源分析——以乌鲁木齐为例[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 562−569. [Liu Zilong, Dai Bin, Cui Zhuoyan, et al. Concentration characteristics and potential source of atmospheric pollutants: A case study in Urumqi[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 562−569.]

[40] Yang Y J, Zheng Z F, Yim S Y L, et al. $PM_{2.5}$ pollution modulates wintertime urban heat island intensity in the Beijing-Tianjin-Hebei megalopolis, China[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(1), doi: 10.1029/2019GL084288.

[41] Wu H, Wang T J, Wang Q G, et al. Radiative effects and chemical compositions of fine particles modulating urban heat island in Nanjing, China[J]. Atmospheric Environment, 2021, 247: 118201, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118201.

[42] 余光明, 徐建中, 康世昌, 等. 祁连山老虎沟地区大气颗粒物输送轨迹及潜在源区[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 671−679. [Yu Guangming, Xu Jianzhong, Kang Shichang, et al. Trajectory analysis of atmospheric transport of particles in Laohugou area, western Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 671−679.]

[43] 张强, 吕世华, 张广庶. 山谷城市大气边界层结构及输送能力[J]. 高原气象, 2003, 22(4): 346−353. [Zhang Qiang, Lv Shihua Zhang Guangshu. The structure of atmospheric boundary layer over valley city and its transfer ability[J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(4): 346−353.]

[44] 张强. 地形和逆温层对兰州市污染物输送的影响[J]. 中国环境科学, 2001, 21(3): 230−234. [Zhang Qiang. The influence of terrain and inversion layer on pollutant transfer over Lanzhou City[J]. China Environmental Science, 2001, 21(3): 230−234.]

[45] 张强. 兰州大气污染物浓度与局地气候环境因子的关系[J]. 兰州大学学报, 2003, 39(1): 99−106. [Zhang Qiang. A study of the interaction between concentration of pollutants and the climatic and environmental factors of Lanzhou[J]. Journal of Lanzhou University, 2003, 39(1): 99−106.]

[46] Zhang Q, Li H Y. A study of the relationship between air pollutants and inversion in the ABL over the city of Lanzhou[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(4): 879−886.

[47] 胡隐樵, 张强. 兰州山谷大气污染的物理机制与防治对策[J]. 中国环境科学, 1999, 19(2): 119−122. [Hu Yinqiao, Zhang Qiang. Atmosphere pollution mechanism along with prevention and cure countermeasure of the Lanzhou hollow basin[J]. China Environmental Science, 1999, 19(2): 119−122.]

Exploring the interaction between the heat island effect and pollution island effect in Xi'an, China

JIANG Ziqi[1,2,3], WANG Xuhong[1,2,3], FENG Zihao[1,2,3], CUI Siying[1,2,3], YANG Xia[1,2,3]

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 3. Xi'an Urban Ecosystem Positioning Observation and Research Station, Xi'an 710127, Shaanxi, China)

Abstract: Surface/Canopy Urban Heat Island (SUHI/CUHI) effect and Atmospheric/Near-surface Urban Pollution Island (AUPI/NSUPI) effect interact and influence each other, significantly threatening the urban ecological environment. Based on the spatial coupling analysis and attribution method, the impact of AUPI on SUHI under radiation effect and CUHI on NSUPI under turbulence mixing in Xi'an city from 2003 to 2020 were explored using land surface temperature, air temperature, Aerosol Optical Depth (AOD), and $PM_{2.5}$ data. The results indicated that: (1) Due to the difference in aerosol radiation effect between day and night in winter, SUHI intensity in winter is <0.2 K. The strong aerosol radiation cooling effect causes low ground temperature in urban areas and cooler in urban areas than in rural areas. When the SUHI intensity is greater than 2.2 K at night, the long-wave radiation effect of aerosol is enhanced, and the pollutant particles suspended in the urban space become the "insulation layer" of the city. (2) Significant CUHI in spring and summer enhanced atmosphere turbulent mixing, causing the diffusion of pollutant particles near the surface in urban regions. $PM_{2.5}$ concentration and NSUPI intensity decreased correspondingly on urban surfaces. In autumn and winter, the atmospheric inversion layer obstructed air ascending movement driven by the CUHI effect. $PM_{2.5}$ particles aggregated and accumulated in near-surface urban areas, and NSUPI was enhanced accordingly. Additionally, the contribution of haze to surface heat island by attribution quantitative analysis suggested that AOD in rural or urban areas was significantly negatively correlated with SUHI at night and correlation coefficients were −0.431 and −0.386, respectively. This suggested that the main radiation effect of haze on the surface heat environment at night was the cooling effect, while the weakening or strengthening effect of haze on the local climate of urban heat islands was mainly attributed to the positive or negative difference in AOD in urban and rural areas. The UHI and UPI effects are inseparable. It is very important to promote the comprehensive study of urban climate and pollution for constructing a green urban ecological environment.

Keywords: Xi'an; surface/canopy urban heat island; atmospheric/near-surface pollution island; spatial coupling analysis; attribution method